

Модель динаміки станів угруповання радіоелектронних засобів у задачах забезпечення електромагнітної сумісності

**Мохаммед А. Кашмула, Маан І Анад Алсалім, Наорс І Анад Алсалім,
М. В. Москалець**

Розроблено динамічну модель множинних взаємодій n -елементної складної системи мобільного зв'язку, в якій враховано характер міжелементних зв'язків і фазових станів угруповання радіоелектронних засобів. Модель описує електромагнітну обстановку угруповання радіоелектронних засобів в просторі станів при груповому використанні частотного ресурсу.

Проведене моделювання динаміки взаємодії і фазових станів угруповання радіоелектронних засобів, при груповому використанні частотного ресурсу.

Показано, що при досить великих значеннях коефіцієнту росту числа радіоелектронних засобів може відбуватися як різке збільшення рівня інтенсивності взаємодій, так і різке зниження, характерне для тих ситуацій, які виникають в системах мобільного зв'язку у час найбільшого навантаження, в місцях великої щільності мобільних користувачів.

Проведено аналіз динамічної поведінки угруповання радіоелектронних засобів системи мобільного зв'язку при різній інтенсивності лінійних і нелінійних множинних взаємодій сукупний характер яких відображається нормованим значенням відношення сигнал/(завада+шум). Розглянута динаміка нерівноважних станів угруповань 2- мобільних мереж при різних значеннях інтенсивності взаємодій. Встановлено, що нерівноважний стан мобільної системи зв'язку настає при зростанні сумарного рівня групового впливу випромінюючих пристроїв на приймальні пристрої при нормованому значенні інтенсивності взаємодій більше ніж 1,4.

Виявлено умови, за яких угруповання радіоелектронних засобів системи мобільного зв'язку зможуть функціонувати без погіршення показників якості, що відображені сумарним рівнем групового впливу випромінюючих пристроїв на приймальні пристрої, за умов оптимального розподілу частотного ресурсу.

Показано, як за допомогою нелінійної системи Вольтера, що моделює динаміку взаємодій угруповання радіоелектронних засобів, можна аналізувати її стан в майбутньому. Дана модель дозволяє виконувати аналіз стану угруповання радіоелектронних засобів при різних, конкретних параметрах окремих типів радіоелектронних засобів, характері і інтенсивності їх взаємодій в угрупованні при діючому розподілу ресурсів.

Ключові слова: динамічна модель, множинні взаємодії, електромагнітна обстановка, розподіл ресурсів, розподіл частот.

1. Вступ

Сучасний всесвітній розвиток засобів телекомунікацій йде по шляху глобалізації та персоналізації зв'язку, інтенсивного створення нових засобів і систем наземного і супутникового базування і, так само, їх широкій інтеграції.

Створення нових глобальних телекомунікаційних систем і мереж, інтенсивний розвиток корпоративних систем зв'язку, значне зростання персональних засобів зв'язку і обсягів послуг, що надаються висуває на перший план проблему електромагнітної сумісності (ЕМС) різних засобів телекомунікацій, і в першу чергу радіоелектронних засобів передачі і прийому інформації [1].

Необхідність аналізу задач ЕМС виникає як при проведенні тих чи інших заходів, пов'язаних зі зміною електромагнітної обстановки (ЕМО) в угрупованні, так і в результаті введення тих чи інших заходів щодо поліпшення ЕМС в цьому угрупованні. За останні роки все частіше виникає потреба в радикальних змінах і перерозподілу планів використовуваних частотних смуг, що пов'язано зі зміною вимог в першу чергу до систем мобільного зв'язку (СМЗ). Практика показує [2], що радіочастотний діапазон грає все більшу роль в різних задачах, в тому числі в сучасних інфокомунікаційних системах [3]. Більш того, радіочастотний спектр поступово перерозподіляється для забезпечення сучасних потреб інформаційного суспільства. Розвиток сучасних безпроводових систем різного призначення тягне за собою використання великої кількості стаціонарних і мобільних радіоелектронних засобів (РЕЗ).

Забезпечення їх радіочастотним ресурсом в умовах його дефіциту призводить до необхідності розробки і застосування нових методів призначення радіочастот. Це в свою чергу вимагає якісного вирішення задачі ЕМС.

На даний час існує багато розроблених методик аналізу ЕМС РЕЗ, як правило, заснованих на детермінованому підході при оцінці параметрів ЕМО, наприклад, рівнів корисного сигналу і завад, їх спектрального складу і т. д. Дані методики дозволяють з певною точністю зробити оцінку ЕМС.

В умовах складної ЕМО в частотних діапазонах роботи сучасних систем мобільного зв'язку для якісного аналізу ЕМС, необхідна інформація про кількісні характеристики завад, що діють в конкретному випадку. Необхідно знати, які їхні енергетичні, спектральні і статистичні характеристики. ЕМО також ускладнюється багатопроміневістю, що обумовлена випадковим переміщенням РЕЗ, що розглядаються, тих РЕЗ що впливають, а також різних об'єктів і людей, неточністю характеристик діаграм спрямованості антен і т. і.

Ймовірнісна оцінка враховує параметри ЕМО що змінюються випадковим чином, тобто ймовірнісний характер множинних впливів РЕЗ систем мобільного зв'язку, ймовірність виникнення ефектів інтермодуляції та частотних складових спектру нелінійного походження і т. д. При цьому, розрахунковим значенням інтенсивностей завади і сигналу ставляться щільності ймовірностей їх виникнення, а сприйнятливість РЕЗ до завад оцінюється при використанні статистичних моделей завади і сигналу.

Для вирішення питання про наявність чи відсутність сумісності необхідно встановити характер впливу завад і оцінити результати цього впливу на якість функціонування РЕЗ в даному угрупованні. Вибір конкретної моделі визнача-

ється методом аналізу, вимогами до його точності, властивостями і достовірністю вихідних даних. Наприклад, при високому ступені взаємодії елементів в угрупованні РЕЗ настає нерівноважний стан системи, що призводить до втрати її стійкості. З точки зору радіофізичного трактування такий стан може настати при множинному завадовому впливі в угрупованні РЕЗ систем мобільного зв'язку, що виникає в тому числі і за умов неоптимального розподілу частотного ресурсу.

Аналіз ЕМС в угрупованні радіоелектронних засобів базується на результатах дослідження електромагнітної обстановки і параметрів, що впливають на ЕМС на якісному і кількісному рівнях. Тому є доцільним знаходження рівнів граничних множинних впливів, при яких настає нерівноважний стан угруповання РЕЗ систем мобільного зв'язку при якому стає неможливим функціонування системи за показниками якості.

У зв'язку з цим актуальною є розробка математичної моделі станів угруповання радіоелектронних засобів при груповому використанні частотного ресурсу, що заснована на динамічній моделі множинних взаємодій n -елементів складної системи, в якій враховано характер міжелементних зв'язків і фазових станів.

Розробка такої моделі дозволить ґрунтовно проводити аналіз стану угруповання РЕЗ мобільних систем зв'язку при вирішенні задачі оптимального розподілу частотного ресурсу угруповання радіоелектронних засобів в умовах нелінійних електромагнітних впливів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Необхідність аналізу завдань ЕМС виникає як при проведенні тих чи інших заходів, пов'язаних зі зміною ЕМО в угрупованні, так і в результаті введення тих чи інших заходів щодо поліпшення ЕМС в цьому угрупованні. За останні роки все частіше виникає потреба в радикальних змінах і перерозподілу планів використовуваних частотних смуг, що пов'язано зі зміною вимог в першу чергу до систем мобільного зв'язку. Умови вирішення задачі призначення радіочастот в системах мобільного зв'язку відрізняються різноманіттям, обумовленим кількістю і щільністю розміщення РЕЗ, ступенем їх взаємовпливу, обсягом виділеного частотного ресурсу і обмеженнями на його використання, що не дозволяє розробити універсальний метод присвоєння частот, так як багато відомих методів мають обмеження або по розмірності задачі, або по точності одержуваних результатів [3].

Для розробки методів частотного планування при різних умовах експлуатації РЕЗ, придатних для реалізації радіочастотними органами, необхідна розробка оптимальних алгоритмів призначення частот, прийнятних за швидкістю і точністю з урахуванням властивостей і специфіки систем мобільного зв'язку. Ця задача тісно пов'язана з проблемою електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів.

Відомо, що радіоелектронні засоби в задачах забезпечення їх електромагнітної сумісності можна групувати за такими основними показниками [3]:

- 1) за типами засобів в угрупованні – групи з однотипними і різнотипними РЕЗ;

2) за типами врахованих небажаних впливів – по сумісним, позасмуговим (сусіднім) і побічним каналами прийому;

3) за щільністю розміщення РЕЗ в групі – "розріджені" і "зосереджені" групи.

В "розріджених" угрупованнях враховуються дуельні ситуації взаємовпливу РЕЗ, а в "зосереджених" проводиться облік групового впливу завад, що вимагає застосування відповідних методик щодо комплексного виду оцінки ЕМС.

Так, в роботах [4–10] розглядаються нові аналітичні підходи в аспектах модернізації методів призначення частот в системах безпроводового і мобільного зв'язку з позицій оцінки ЕМС.

В роботі [4] розглянута стільникова інфраструктура п'ятого покоління (5G), що представлена у вигляді щільного і неоднорідного розгортання невеликих осередків стільник, що перекриваються з існуючими макроелементами мережі радіодоступу (RAN – Radio Access Network). Представлено дослідження на основі технології програмно-конфігуріємій безпроводовій мережі (SDWN Software-Defined Wireless Networking) для виконання призначення частот, завад і управління передачею обслуговування в середовищі гетерогенних хмарних мереж радіодоступу (H-CRAN – Heterogeneous Cloud Radio Access Networks), які виступають в якості кандидата архітектури для стійкого розгортання 5G. У цій статті обговорюється, як SDWN може підтримувати розвиток гнучкої, програмованої і стійкої інфраструктури для 5G. Разом з тим, концепція SDWN передбачає аналіз сигнально-завадової обстановки і пошук вільних (незавантажених) ділянок спектру на основі алгоритму панорамного аналізу діапазонів частот та алгоритму послідовного переналаштування радіочастот, який потребує прямий перебір частотних каналів, що використовуються, і потім приймається рішення щодо адаптації параметрів роботи конфігуруємої мережі.

В роботі [5] досліджується проблема частотного присвоєння мережі датчиків безпроводового спостереження WSSN (wireless surveillance sensor network) за допомогою методу розмальовки графу. Результати показують, що ці методи дуже підходять для цієї проблеми, оскільки здатні знайти найкращі рішення серед альтернативних методів. Недоліком є наближене рішення виходячі із специфіки розглянутого методу.

В роботі [6] застосовується генетичний алгоритм до проблеми розподілу частот радіостанцій, а традиційний алгоритм удосконалюється шляхом впровадження "жадібного" алгоритму, гібридизації та інших методів. Результати моделювання показують, що вдосконалений генетичний алгоритм може ефективно вирішити проблему присвоєння радіочастот і має високу швидкодію. До недоліків генетичного алгоритму слід віднести досить високу обчислювальна ресурсомісткість, що призводить до того, що в ході моделювання еволюції багато рішень відкидаються як неперспективні внаслідок чого не гарантовано отримання оптимального рішення.

В роботі [7] представлений ймовірнісний жадібний алгоритм для вирішення проблеми призначення каналів в стільникових мережах. Час, що витрачається даним алгоритмом, є прийнятним коли швидке призначення каналів має першорядне значення, в той час як граничне відхилення від оптимальності може бути допустимим. Швидкість роботи "жадібного" алгоритму щодо інших алгоритмів досить висока, проте, точне рішення може бути отримано не завжди.

В роботі [8] запропонована схема, яка поєднує в собі здатність збіжності нейронної мережі і можливість глобального пошуку генетичного алгоритму для вирішення задачі призначення частот.

В роботах [9,10] впроваджена стратегія присвоєння каналів на основі адаптивного генетичного алгоритму (GA – genetic algorithm) для управління ресурсами та зменшення ефекту завад ЕМС.

Варто також відмітити, що в аспекті проблем динамічного розподілу ресурсів в системах мобільного зв'язку особливе місце займають задачі розрахунку і планування мереж мобільного зв'язку з використанням фемтостільників.

Незважаючи на загальну проблему оптимізації радіочастотного ресурсу при використанні фемтостільників в макромережі мобільного зв'язку, в роботі [11] вирішується задача оптимізації, яка поєднує дві підзадачі, а саме: оптимальне розподілення підканалів і оптимальне розподілення потужностей РЕЗ макромережі і фемтостільник. Для вирішення такої задачі цілочисельного програмування запропоновано ефективний алгоритм розподіл ресурсів на основі розподіленого спектрального зондування спектру DIRA (Distributed Imperfect-Spectrum-Sensing-Based Resource Allocation).

Судячи з аналізу роботи [12] даної тематики, робимо висновок, що простим вирішенням проблеми розміщення фемтостільників є прямий перебір варіантів. Однак зі збільшенням кількості фемто-стільників завдання стає *NP*-повним.

З точки зору аналізу електромагнітної сумісності в розглянутих роботах безпосередньо вирішується саме задача оптимального призначення частот в безпроводових мережах. Великий науковий і практичний інтерес викликають і інші завдання ЕМС: аналіз того, яка ефективність тих чи інших дій, які порушують зміну ЕМО в конкретних умовах, при конкретних сигналах, системах, алгоритмах обробки і т. і.

Судячи з проведеного аналізу джерел, можна вказати на те, що існуючі методи розподілу частотного ресурсу при аналізі ЕМС РЕЗ і методи експертних оцінок частотного присвоєння, які використовуються при введенні нових РЕЗ, ґрунтуються загалом на методах, що розроблені для стаціонарних систем радіозв'язку більш придатних для дуельних завадових взаємодій.

В умовах же динамічної обстановки, що швидко змінюється, з важко прогнозованою сигнально-завадовою ситуацією, множинного характеру електромагнітних взаємодій потрібно застосовувати більш загальний стохастичний підхід, що дозволяє враховувати груповий характер впливу в угрупованні РЕЗ.

Таким чином, була виявлена проблема, яка полягає в тому, що безпосередньо на зазначені угруповання РЕЗ систем мобільного зв'язку не можуть бути поширені детерміністські моделі оцінки стану угруповання при вирішенні задачі розподілу частотного ресурсу. Для її вирішення доцільно було б розробити таку аналітичну модель станів угруповання РЕЗ, яка адекватно відображає динаміку змін цих станів з позицій аналізу ЕМС в умовах дії множинного характеру електромагнітних впливів.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка динамічної моделі множинних взаємодій п-елементів складної системи мобільного зв'язку, в якій враховано характер міжелементних зв'язків і фазових станів при груповому використанні частотних ресурсів. Це дасть можливість проведення досить повного аналізу умов ЕМС в угрупованнях РЕЗ систем мобільного зв'язку, оцінювати ЕМО вже діючих мереж і надавати рекомендації щодо мереж, які розгортаються при вирішенні задачі розподілу частотного ресурсу.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- на основі складної моделі п-елементної системи з множинними взаємодіями розробити математичну модель опису електромагнітної обстановки угруповання радіоелектронних засобів в просторі станів при їх груповому використанні частотного ресурсу;
- представити рекурентний вираз для розрахунку сумарного рівня інтенсивності взаємодій угруповання радіоелектронних засобів із застосуванням математичної моделі Вольтерра та провести моделювання динаміки взаємодії елементів і фазових станів угруповання радіоелектронних засобів, при груповому використанні частотного ресурсу;
- провести аналіз стану взаємодії елементів системи за яких угруповання радіоелектронних засобів системи мобільного зв'язку зможуть функціонувати без погіршення якісних показників, які відображають сумарний рівень групового впливу випромінюючих елементів на приймальні пристрої, за умов оптимального розподілу частотного ресурсу.

4. Розробка математичної моделі опису стану електромагнітної обстановки в угрупованні радіоелектронних засобів.

В групуванні радіоелектронних засобів (РЕЗ) основні параметри самих засобів $\vec{x}(t)$ зазвичай відомі, детерміновані. Макростан всього групування – випадковий. Це пояснюється впливом безлічі невизначених, випадкових умов, формованих характеристиками поширення радіохвиль (ПРХ). В результаті випадкових взаємодій $x_{ij}(t)$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$, де n – число РЕЗ, в самих параметрах РЕЗ відбуваються зміни. В групуванні РЕЗ є відповідні динамічні взаємодії, які проявляються в результаті вимірів і спостережень і характеризуються вектором $\vec{y}(t)$. Динаміка цих змін описується досить загальним диференціальним рівнянням

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = k\Phi[\vec{x}(t), Y^*(t)], \quad (1)$$

де $k = \text{diag}(k_i, i \in \overline{1, n})$, якщо x_i незалежні або матриця $K[n \times n]$ при наявності їх залежності.

Успішність вирішення задачі електромагнітної сумісності розглянутого групування залежить від наявних ресурсів $g_k = g_k(\vec{x}(t), t)$, $k \in \overline{1, r}$, а також від

відомих апіорних ймовірностей $a_{ij} = a_{ij}(\vec{x}(t), t); i, j \in \overline{1, n}$ і параметрів c_{ijk} , що визначають характеристики даного зв'язку між РЕЗ, які від $x(t)$ не залежать.

Крім того, самі спостереження $\vec{y}(t)$ стають залежні від стану. Тому, більш конкретно можна рівняння (1) представити у вигляді

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = \Phi[\vec{x}(t), Y^*(\vec{x}(t), t)].$$

Наявні ресурси g_k визначаються сумою частотно-територіальних, часових, поляризаційних, енергетичних і інших параметрів РЕЗ та ліній зв'язку. Їх можна представити у вигляді:

$$g_k(\vec{x}(t), t) = \sum_{i,j=1}^n c_{ijk} y_{ij}, \quad y_{ij} \geq 0, k \in \overline{1, r}, i, j \in \overline{1, r}. \quad (2)$$

В системі групування РЕЗ в процесі її функціонування реалізується відповідний перерозподіл ресурсів $Y^*(t)$, який визначається моделями стаціонарних станів, що описуються задачами максимізації ентропії системи [9-11]

$$H(Y) = \sum_{i,j=1}^n y_{ij} \ln \frac{a_{ij}}{y_{ij}} + y_{ij} \rightarrow \max \quad (3)$$

при відповідних обмеженнях на ресурси.

Динаміка стану розподільного процесу визначається рішенням $Y^*(t)$ цієї задачі, який, як випливає з (2) і (3), залежить від її параметрів a_{ij} , c_{ijk} і g_k .

Таким чином, модель динаміки станів макросистеми набуває такого вигляду:

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = \Phi[\vec{x}(t), Y^*(\vec{x}(t), t)];$$

$$Y^*(\vec{x}(t), t) = \arg \max \left[H(Y) \left| \sum_{i,j=1}^n c_{ijk} y_{ij} = g_k(\vec{x}(t), t) \right. \right],$$

$$\text{де } H(Y) = \sum_{i,j=1}^n y_{ij} \ln \frac{a_{ij}}{y_{ij}} + y_{ij}.$$

Розглянемо структурну схему макросистеми, утворену групуванням РЕЗ (рис. 1). Очевидно ця схема є окремим випадком базової моделі системи, зображеної на рис. 1.

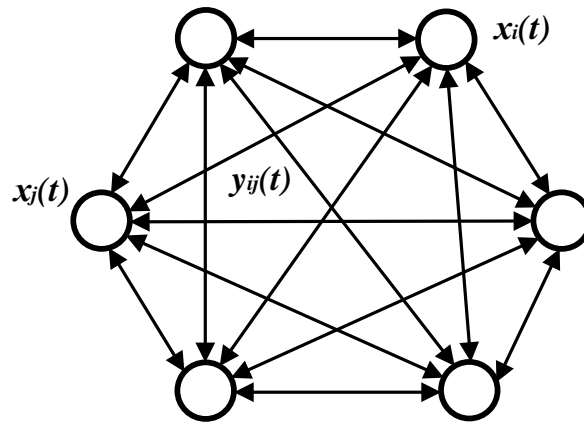


Рис. 1. Структурна схема взаємодій y_{ij} в макросистемі при груповому використанні ресурсу

Електромагнітні взаємодії $y_{ij}(t)$ відбуваються між елементами $x_i(t)$ і $x_j(t)$, відповідно: джерелами і рецепторами.

Взаємодіючі зв'язки між елементами визначаються матрицями $C_k = [c_{ijk}; i, j \in \overline{1, n}]$ які складаються з 0 і 1 і визначають наявність або відсутність такого зв'язку. Елементи вектора $Y^*(t)$ в загальному випадку являють собою комплексні величини, і визначають амплітуду і фазу маючих місце взаємодій. Аналіз такої системи представимо нижче.

Вираз (1) представляє загальна модель динаміки нерівноважних станів, взаємодії в якій характеризуються вектором $\vec{y}(t)$. Очевидно в такій нерівноважній системі відзначається 2 основних процеси (потоки): відновлення і розподілу. Такий процес спостерігаємо в системах мобільного зв'язку, коли абонентські станції споживають і звільняють ресурс БС, таким чином відбувається розподіл і відновлення ресурсу ССС.

Позначимо через $\Phi[\vec{x}(t), Y(t)]$ потік відновлення і через $Q[\vec{x}(t), Y(t)]$ потік розподілу. Ці потоки залежать від стану $x(t)$ – процесу відновлення і стану $Y(t)$ – процесу розподілу.

В рамках припущень про те, що час відновлення на багато більше часу розподілу [10], можна записати наступну, в загальному випадку нелінійну систему рівнянь:

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = \Phi[\vec{x}(t), Y^*(\vec{x}(t), t)], \quad (4)$$

$$\varepsilon \frac{dY(t)}{dt} = Q[\vec{x}(t), Y^*(\vec{x}(t), t)]. \quad (5)$$

де ε – матриця малих параметрів, що визначає інтенсивність радіоелектронних взаємодій в даній системі.

З цих рівнянь видно, що координати $\vec{x}(t)$ змінюються значно повільніше, ніж $Y(t)$. Формування моделі виду (5) для розподільного процесу з обмеженнями і різнотипними ресурсами поки залишається невирішеною задачею [9–11]. Таку модель вдалося побудувати лише для тих випадків, коли динаміка розподільного процесу – марківська, для обмежень балансового типу. В даному випадку можна припустити, що динаміка розподільного процесу – марківська [9–11], оскільки не має значення, коли і як макросистема перейшла в поточний стан, а істотно лише те, який ресурс система використовує на даний момент часу-частотний, поляризаційний, часовий або просторовий.

Проаналізуємо динаміку стану групування РЕЗ. Для цього необхідно описати структуру ресурсів і їх розподіл між РЕЗ. Будемо розглядати групування РЕЗ, що складається з безлічі передавачів і приймачів. Всі вони є споживачами ресурсу. Якщо споживачі ресурсу складаються з n типів з чисельністю Y_i , то кількість ресурсу B є функцією чисельності типів $B = B(Y_1, \dots, Y_n)$. При відсутності споживачів ($Y_1 = \dots = Y_n = 0$) маємо максимальний ресурс $B(0)$. При дуже великій їх кількості ($Y_1 \rightarrow \infty, \dots, Y_n \rightarrow \infty$) ресурс прагне до нуля $B(\infty) = 0$. Число діючих РЕЗ безперервно зростає. Є підстави вважати цю причину головною, провідною до загального "засмічення ефіру". Швидкість зміни чисельності РЕЗ i -го типу визначається появою нових $k_i Y_i$, (коефіцієнти k_i можна прийняти постійними $k_i = \text{const}$) і зникненням функціонуючих $g_i Y_i$. Конкурентна боротьба за ресурс впливає на процес зникнення РЕЗ із взаємодій, тобто коефіцієнти g_i залежать від кількості ресурсу u_i , споживаного в середньому одним РЕЗ, $g_i = g_{i0} - \mu_i u_i$; $g_{i0}, \mu_i > 0$.

Тоді

$$\frac{dY_i}{dt} = \varepsilon_i Y_i + \mu_i w_i, \quad i \in \overline{1, n}, \quad (6)$$

де $w_i = u_i Y_i$ – кількість ресурсу, споживаного i -м типом РЕЗ; $\varepsilon_i = k_i - g_{i0}$.

Розподіл ресурсу B відбувається значно швидше, ніж його відновлення. Тому будемо розглядати стаціонарні стани розподільного процесу при фіксованих на момент часу t кількостях типів РЕЗ.

Механізм цього процесу можна представити таким чином. Нехай ресурс споживається порціями – піддіапазонами (ділянками) частот Δ . Тоді $B = m\Delta$, де m – кількість каналів передачі. Можна припустити, що канали передачі випадковим чином і незалежно один від одного розподіляються по всьому групуванню n типів РЕЗ так, що в кожного типу виявляється кількість ресурсу $w_i = \Delta m_i$.

Для цього розподільного процесу можна вказати деяку апіорну характеристику. Для кожного типу РЕЗ зазвичай відомо нормативну кількість ресурсу a_i . Визначимо величину

$$v_i = \frac{a_i Y_i}{\sum_{i=1}^n a_i Y_i}; \quad 0 \leq v_i \leq 1; \quad \sum_{i=1}^n v_i = 1. \quad (7)$$

Тоді процес випадкового розподілу ресурсу за типами РЕЗ еквівалентний випадковому і незалежному розподілу m каналів за n типами РЕЗ з апіорною ймовірністю розподілу $V = \{v_i, \dots, v_n\}$. Стаціонарний стан такого процесу визначається моделлю виду

$$H(w) = \sum_{i=1}^n (w_i \ln \frac{v_i}{w_i} + w_i) \rightarrow \max \quad \sum_{i=1}^n w_i = B(Y). \quad (8)$$

З урахуванням (7), отримаємо

$$w_i^* = a_i Y_i \frac{B(Y)}{\sum_{i=1}^n a_i Y_i}.$$

Підставимо цей вислів в (4):

$$\frac{dY}{dt} = Y_i (\varepsilon_i + \tilde{a}_i \phi(Y)), \quad (9)$$

де

$$\phi(Y) = \frac{B(Y)}{\sum_{i=1}^n a_i Y_i}.$$

Врахуємо такі якісні властивості функції $B(Y)$, такі як $(B(0) \neq 0, B(\infty) \rightarrow 0)$ і вважатимемо $B_{\max} = B(0)$. З цього випливає, що $\phi(Y)$ буде монотонно спадати для $Y_i \geq 0$.

В цьому випадку коефіцієнти її лінійної апроксимації негативні, тобто

$$\phi(Y) \cong \phi(\tilde{Y}) = \sum_{s=1}^n v_s (Y_s - \tilde{Y}_s), \quad (10)$$

де $v_s \geq 0$, $s \in \overline{1, n}$, $\tilde{Y} = \{\tilde{Y}_1, \dots, \tilde{Y}_n\}$ – фіксовані числа. Підставивши (10) в (9) отримаємо систему Вольтерра, що характеризує динаміку співіснування групування РЕЗ в умовах конкурентної боротьби за загальний ресурс [4]:

$$\frac{dY}{dt} = Y_i \left(\varepsilon_i - \sum_{s=1}^n v_s Y_s \right). \quad (11)$$

Якщо використовувати для опису функції $\phi(Y)$ квадратичну апроксимацію, то отримаємо нелінійну систему Вольтерра, що враховує вплив випадкових завад на стан угруповання РЕЗ:

$$\frac{dY}{dt} = Y_i \left[\varepsilon_i - \sum_{s=1}^n v_s Y_s - \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^n v_{sj} Y_s Y_j \right]. \quad (12)$$

Для моделювання динаміки стану взаємодій в групуванні РЕЗ на ЕОМ зручно перейти від системи (12) до її рекурентного запису

$$Y_i(k+1) = Y_i(k) + Y_i(k) \left[\varepsilon_i - \sum_{s=1}^n v_s Y_s(k) - \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^n v_{sj} Y_s(k) Y_j(k) \right], \quad (13)$$

де k – дискретний час, $i, j, s \in \overline{1, n}$.

5. Моделювання динаміки взаємодії елементів і фазових станів угруповання радіоелектронних засобів

Як приклад розглянемо динаміку макростану групування чотирьох типів РЕЗ ($n = 4$) для різних значень ε , які враховують тенденцію зростання їх чисельності. Тому, в якості вихідних даних прийнемо: $\varepsilon = 0, 1, \dots, 4$. Кількість кожного типу РЕЗ на початковий момент – випадкове число в інтервалі від 1 до 100, частотний і енергетичний ресурси – однакові для всіх типів.

На рис. 2 показано зміну взаємодій (чисельності) РЕЗ при $\varepsilon_1 = 0.1$; $\varepsilon_2 = 0.2$; $\varepsilon_3 = 0.1$; $\varepsilon_4 = 0.3$ в часі. Номери ліній 1-4 відповідають індексам типів РЕЗ.

Як видно з рис. 2, при малих значеннях ε залежність взаємодій РЕЗ практично лінійно зростає в часі і при подальшому k – зріст припиняється. Така тенденція, очевидно, характерна для початкових етапів розвитку РЕЗ.

При значеннях $\varepsilon_1 = 2$; $\varepsilon_2 = 2.1$; $\varepsilon_3 = 2$; $\varepsilon_4 = 2$ (рис. 3) відзначається 2 характерні області графіків. Початкова область, де відзначається різке збільшення числа взаємодій, і стаціонарна, рівноважна частина з подальшими невеликими коливаннями в часі, що пов'язано з перерозподілом ресурсу.

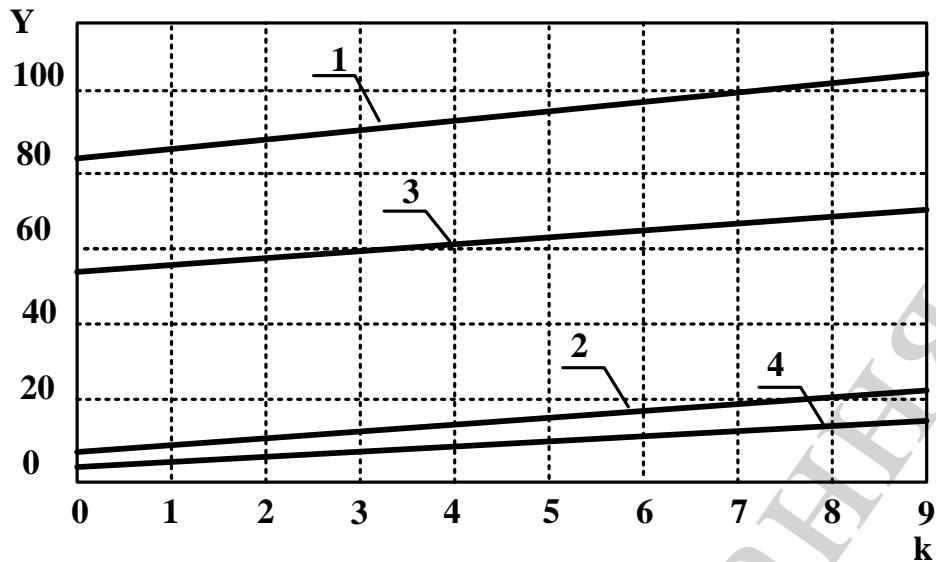


Рис. 2. Залежність числа споживачів при слабкій інтенсивності взаємодій (1 – $\varepsilon_1 = 0.1$; 2 – $\varepsilon_2 = 0.2$; 3 – $\varepsilon_3 = 0.1$; 4 – $\varepsilon_4 = 0.3$)

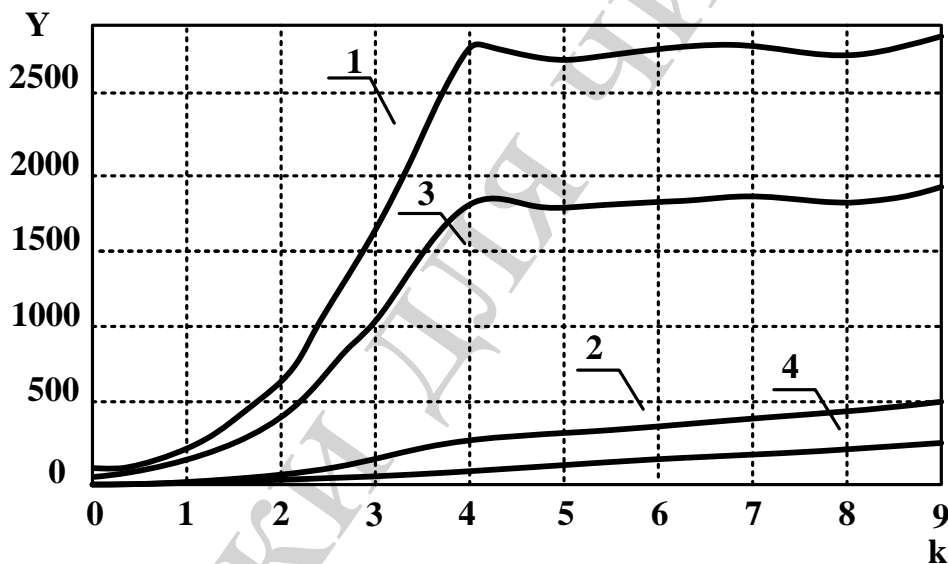


Рис. 3. Залежність числа споживачів від часу при докритичній інтенсивності взаємодій

При значеннях $\varepsilon_1 = 2.6$; $\varepsilon_2 = 2.65$; $\varepsilon_3 = 2.6$; $\varepsilon_4 = 2.67$ (рис. 4) також відзначаються 2 області.

Початкова область, з монотонним зростанням збільшення взаємодій, потім спостерігаються помітні коливання, пов'язані з досягненням критичних значень по насиченню системи, з впливом не тільки чисельності РЕЗ, а й обмеження наявного ресурсу.

Проаналізована також динаміка взаємодій угруповання РЕЗ при значеннях $\varepsilon_1 = 3.7$; $\varepsilon_2 = 3.8$; $\varepsilon_3 = 3.7$; $\varepsilon_4 = 3.9$ (рис. 5), при яких система набуває поза межний насичений стан.

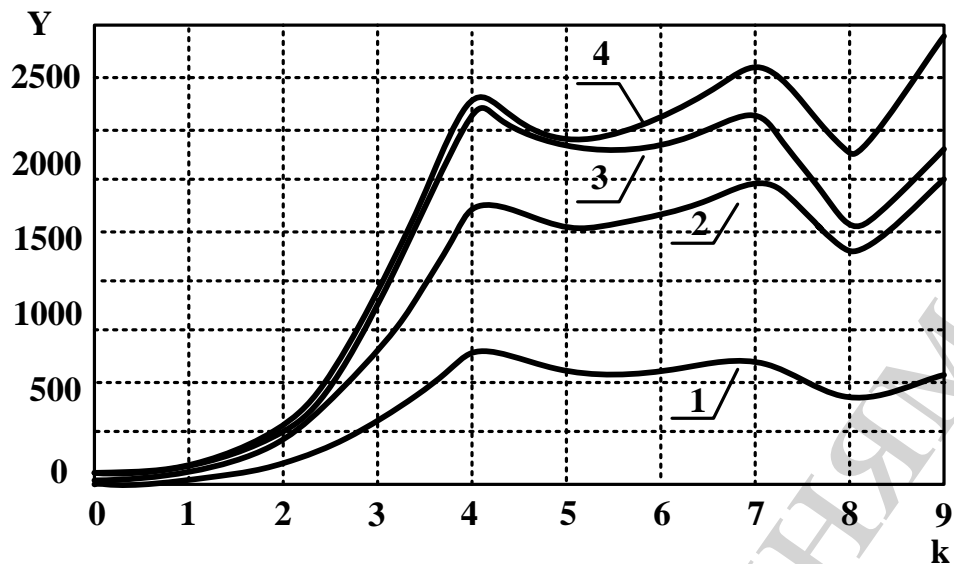


Рис. 4. Залежність числа споживачів від часу в області критичної інтенсивності взаємодій (1 – $\varepsilon_1 = 2.6$; 2 – $\varepsilon_2 = 2.65$; 3 – $\varepsilon_3 = 2.6$; 4 – $\varepsilon_4 = 2.67$)

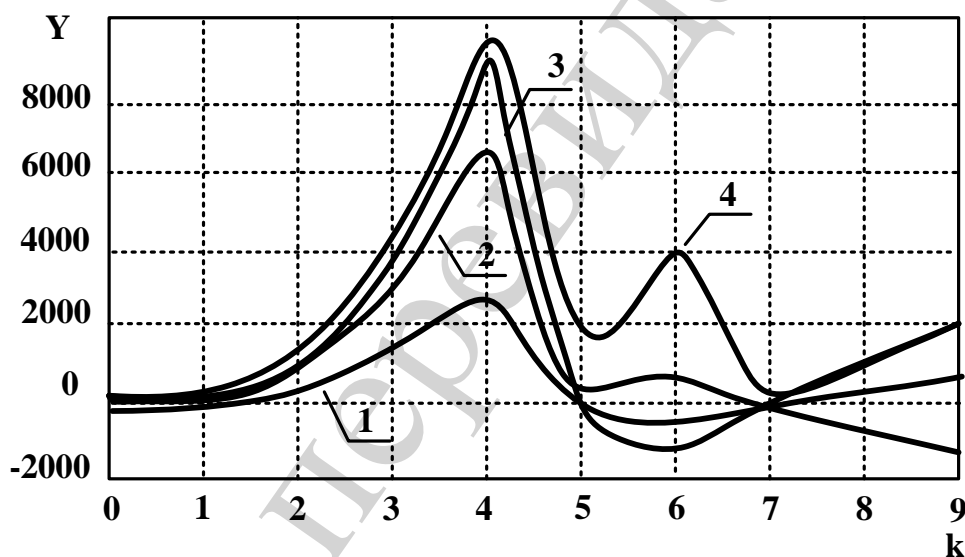


Рис. 5. Залежність числа споживачів від часу в закритичній області взаємодій (1 – $\varepsilon_1 = 3.7$; 2 – $\varepsilon_2 = 3.8$; 3 – $\varepsilon_3 = 3.7$; 4 – $\varepsilon_4 = 3.9$)

Отримані результати свідчать про те, що при досить великих значеннях коефіцієнтів росту числа РЕЗ динаміка взаємодій стає непередбачуваною: може відбуватися як різке збільшення взаємодій, так і різке зниження, характерне для тих ситуацій, які виникають в стільникових системах в ЧНН, в місцях скупчення абонентів.

6. Аналіз стану взаємодії угруповання РЕЗ функціонують без погіршення якісних показників

Розглянемо динаміку нерівноважних станів угруповань 2-х мобільних мереж при різних значеннях ε , що враховують інтенсивність взаємодій. В якості

інтенсивності взаємодій можна вибрати параметр оцінки ЕМС мереж, такий як відношення допустимого ВСЗШ до реального ВСЗШ на РЕЗ мереж $\varepsilon = \frac{h_{\text{доп}}^2}{h^2}$.

ВСЗШ визначається як відношення потужності корисного сигналу до суми потужностей завад. Під сумою потужностей завад мається на увазі загальний шумовий фон, що надходить від РЕЗ сторонніх (заважаючих) мереж.

На рис. 6, а представлені залежності взаємодії (взаємного впливу) Y_i двох мереж при низьких інтенсивностях взаємодій $\varepsilon \ll 1$, тобто передбачається, що реальне ВСЗШ на багато більше допустимого. Номери кривих відповідають номеру мережі. Як видно з рис. 6, а, при малих, але різних значеннях ε , залежність впливу між РЕЗ двох мереж практично лінійно зростає в часі і при подальшому k – зріст припиняється. Різниця полягає в тому, що $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$. Фізичний сенс даної нерівності полягає в тому, що друга мережа створює більший за потужністю загальний шумовий фон в порівнянні з першою мережею. Тому і впливу $Y_1 < Y_2$.

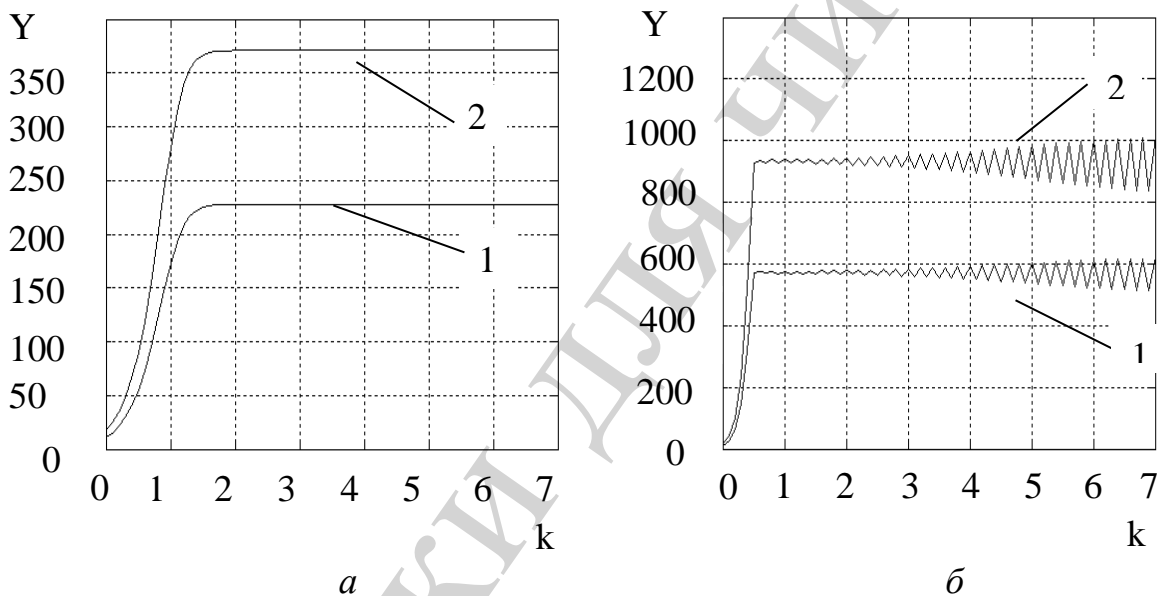


Рис. 6. Залежність впливу мереж: а – при слабкій інтенсивності взаємодій; б – при середній інтенсивності взаємодій

При середніх значеннях $\varepsilon \approx 1$ (рис. 6, б) відзначається 2 характерні області графіків. Початкова область, де відзначається різке збільшення взаємодій, і стаціонарна, нерівноважна частина з подальшими помітними коливаннями в часі, що пов'язано з перерозподілом і обмеженням наявного ресурсу.

Проаналізовано випадок роботи мережі при великих значеннях інтенсивностей $\varepsilon \gg 1$ (рис. 7), при яких система набуває поза межний насичений стан. Отримані результати свідчать про те, що при досить великих значеннях інтенсивності РЕЗ динаміка взаємодій стає непередбачуваною: може відбуватися як різке збільшення взаємодій, так і різке зниження, характерне для тих ситуацій, які виникають в СМЗ при позаштатних режимах роботи мережі.

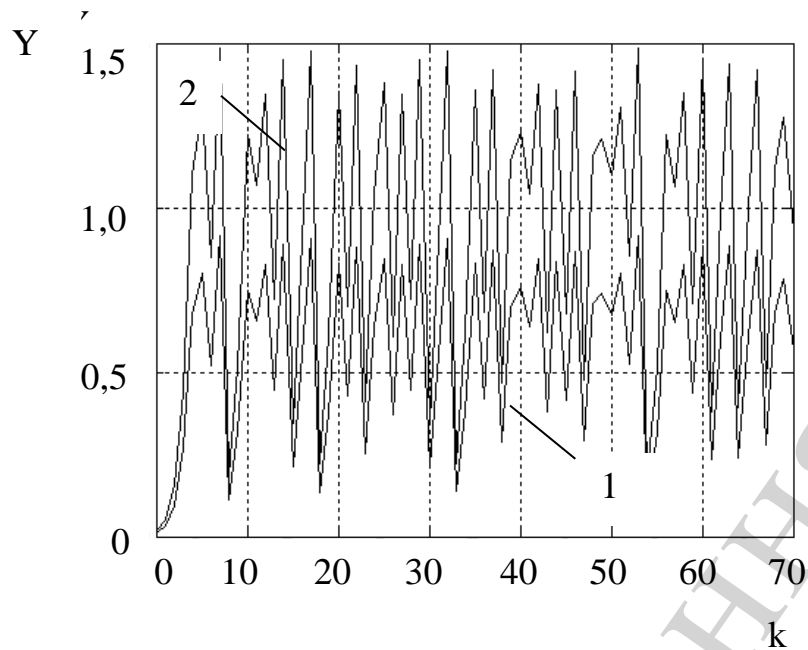


Рис. 7. Залежність впливу мереж при високій інтенсивності взаємодій $\varepsilon \gg 1$
(1 – мобільна мережа 1; 2 – мобільна мережа 2)

Вивчення нерівноважних станів представляє значний і самостійний інтерес. В роботі продемонстрована методика його використання для аналізу ЕМС.

Дана модель дозволяє виконувати аналіз при різних, конкретних параметрах елементів мережі, їх взаємодій при розподілі ресурсів. Дані дослідження дозволяють дати рекомендації при плануванні, проектуванні, частотно-територіальному плануванні і експлуатації мереж СМЗ. З даного аналізу з'являється можливість визначення рівноважних станів і стійкості динамічних взаємодіючих угруповань мереж СМЗ при тих чи інших значеннях інтенсивності взаємодій ε .

Як виявилось, критичним числом ε , при якому угруповання мереж ще не втрачає стійкості, є $\varepsilon \cong 1,4$. На рис. 8 представлений фазовий портрет взаємодії угруповань мереж, побудований в координатах $\{\bar{Y}, \bar{\varepsilon}\}$. З даного графіка випливає, що в області $\varepsilon > 1,4$ настають роздвоєння траєкторій (біфуркація стану).

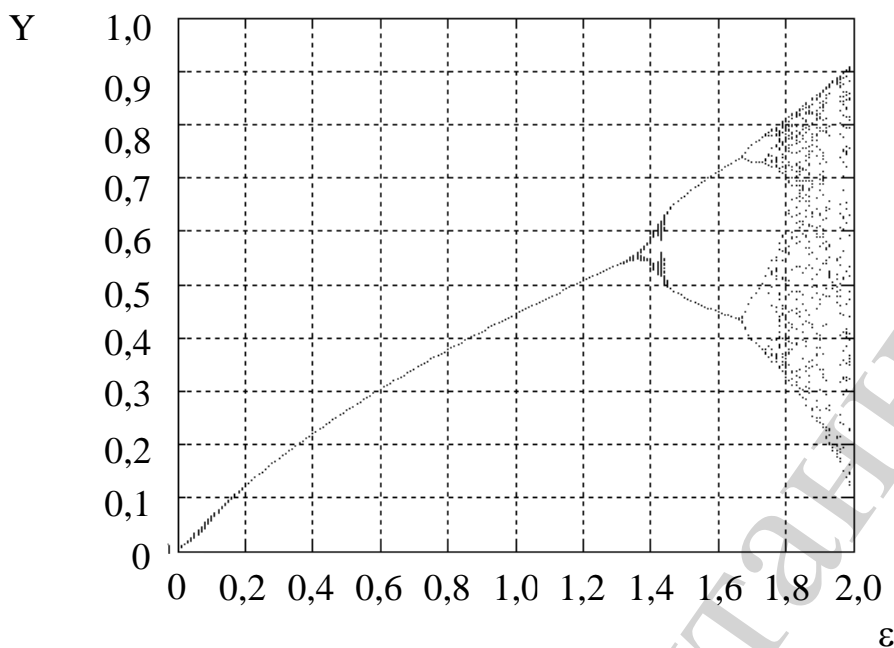


Рис. 8. Фазовий портрет взаємодії угруповань мереж

В області $\epsilon \geq 1,4$ зміни стану спостережуваної системи можуть виявитися значними і неоднозначними при незначних змінах інтенсивностей взаємодії.

7. Обговорення результатів динаміки стану угруповання РЕЗ системи мобільного зв'язку

На основі виразу (12) запропонована нелінійна динамічна модель нерівноважних станів при електромагнітних взаємодіях в угрупованнях РЕЗ систем мобільного зв'язку.

Отримані результати сукупного характеру множинних взаємодій, що відображаються нормованим значенням ϵ відповідно моделі (6). Значення даного показника ϵ залежить, в свою чергу, від мінливих параметрів електромагнітної обстановки, зокрема від сумарного рівня завади, при якому відбуваються дії з боку впливаючих РЕЗ, відстаней між впливаючими РЕЗ, наявністю додаткових коефіцієнтів загасання і т. і.

Під час проведення моделювання динаміки взаємодії елементів і фазових станів угруповання радіоелектронних засобів системи мобільного зв'язку було виявлено, що в залежності від ступеня взаємодії елементів мереж існує три характерних стани функціонування СМЗ: рівноважний стан, перехідний (граничний) режим, позамежний режим, пов'язаний з втратою стійкості (рис.2-5). Отримано умови існування критичного рівноважного стану досліджуваної системи, що надходять в умовах обмеженого ресурсу при різній інтенсивності і кількості взаємодій в цій системі (рис. 6).

Досліджено фазові стани динамічної моделі 2 досліджуваних систем мобільного зв'язку в позамежній області. Як можна бачити з отриманих результатів моделювання, представлених на рис. 7 і рис. 8, в цій області виникають хаоти-

чні режими і біфуркації фазових траєкторій, системи втрачають стійкість. Встановлено, що нерівноважний стан СМЗ настає при зростанні сумарного рівня групового впливу випромінюючих елементів на приймальні пристрої СМЗ при $\varepsilon = 1,4$ і відповідає нормованому значенню співвідношення ВСЗШ $0,7 \cdot (P_c / P_{in})_{don}$. Величина цих хаотичних проявів тим більше, чим глибше система занурюється в позамежну область.

Отримані результати підтверджують перспективу можливості побудови ймовірнісної характеристики стану СМЗ в розглянутій електромагнітній обстановки.

Враховуючи високодинамічний стан каналів мобільного зв'язку, який обумовлений просторовим переміщенням мобільних станцій і багатопроменевістю поширення сигналів, задача динамічного розподілу ресурсів стає NP-складною. Отже для її вирішення необхідно застосовувати методи на базі марківської теорії нелінійної, або лінійної фільтрації, зокрема методи фільтрації Калмана – Б'юсі.

Розроблений метод розширює простір для вирішення в майбутньому задач, щодо аналізу якості функціонування систем мобільного і безпроводового зв'язку в складних сигнально-завадових умовах, вирішення задачі ЕМС внутрішньосистемного і міжсистемного характеру в умовах складної електромагнітної обстановки, в задачах оптимального вирішення розподілу фізичних ресурсів (частотного, часового, просторового, поляризаційного) між елементами мережі, побудови частотно-територіальних планів систем мобільного зв'язку.

Одним із головних обмежень при виборі моделі аналізу ЕМС для СМЗ є обґрунтування критерію, якому повинні відповідати рішення по створенню задовільних умов сигнально-завадової обстановки для забезпечення ЕМС в угрупованні РЕЗ. Складність вирішення задачі ЕМС РЕЗ пов'язана з тим, що в СМЗ параметри корисних сигналів, шумів, а також самих завад, є випадковими, а часто і нестаціонарними процесами з невідомими поточними характеристиками. Спектри частот корисних сигналів і завад зазвичай різні, з різним ступенем перекриття. Все це є причиною різноманіття обраних критеріїв і неоднозначності в оцінці стану ЕМС угруповань РЕЗ.

Більш точним, для оцінки змінних у часі сигналів і завад, є застосування критерію відношення згортки спектрів сигналу і завади у вигляді показника зменшення енергетичного запасу EML (Energy Margin Loss). Разом з тим, для його використання в запропонованій моделі потрібна велика кількість апіорних даних про параметри взаємодіючих елементів. Застосування критерію, заснованого на виборі допустимого рівня ВСЗШ в запропонованій моделі, є певним наближенням. Проте використання критерію ВСЗШ значно спрощує аналіз ЕМО і розрахунок параметрів ЕМС.

Особливістю розробленої моделі є визначення граничних рівнів групових впливів, при яких СМЗ може втратити стійкість внаслідок невиконання допустимого значення критерію ВСЗШ для кожного мережевого елемента. Після розрахунку ВСЗШ необхідно визначити пропускні спроможності каналів і ймовірнісну характеристику якості функціонування, згідно з якою оцінюється реальна можливість функціонування мережі в існуючій ЕМО. Модель дає можливість фахівцям обґрунтовано проводити аналіз ЕМС угруповання мереж систем мо-

більшого зв'язку, оцінювати ЕМО вже діючих мереж і розробляти рекомендації по мережам, що будуть вводиться, здійснювати якісне планування мереж з точки зору виконання умов ЕМС.

Подальший розвиток тематики даних досліджень може йти в напрямку створення методики, яка буде враховувати тип РЕЗ СМЗ, моделі випадкового розміщення мережевих елементів, розподіл щільності розміщення елементів мереж, особливості поширення радіохвиль в залежності від умов використання РЕЗ СМЗ з розробкою програмного пакету, який може бути зареєстрований і рекомендований для практичного використання.

9. Висновки

1. Побудована математична модель електромагнітної обстановки угруповання радіоелектронних засобів на основі моделі Вольтерра, що характеризує їх нелінійний характер взаємодій при груповому використанні частотного ресурсу. Отримано рекурентний вираз для моделювання оцінки сукупного характеру електромагнітних взаємодій в угрупованні радіоелектронних засобів.

2. Проведено моделювання динаміки взаємодії і фазових станів угруповання радіоелектронних засобів при груповому використанні частотного ресурсу. Показано, що за допомогою моделі Вольтера, що моделює динаміку взаємодій групування РЕЗ, можна аналізувати її стан в майбутньому. Дана модель дозволяє виконувати аналіз стану угруповання радіоелектронних засобів при різних, конкретних параметрах окремих типів РЕЗ, характері і інтенсивності їх взаємодій в угрупованні при діючому розподілу ресурсів.

3. Розглянута динаміка нерівноважних станів угруповань 2- мобільних мереж при різних значеннях ε , що враховують інтенсивність взаємодій. В якості інтенсивності взаємодій вибрано параметр оцінки ЕМС мереж, такий як відношення допустимого ВСЗШ до реального ВСЗШ на РЕЗ мереж, що дорівнює $0,7(P_c/(P_z + P_{ш}))_{доп}$. Аналіз показав, що угруповання РЕЗ мобільних систем зв'язку зможуть функціонувати без погіршення якісних показників при значеннях взаємодій $\varepsilon \leq 1,4$.

Література

1. Alsaleem, N. Y. A., Kashmoola, M. A., Moskalets, M. (2018). Analysis of the efficiency of space-time access in the mobile communication systems based on an antenna array. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (9 (96)), 38–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150921>
2. Zaker, N. A., Alsaleem, N., Kashmoola, M. A. (2018). Multi-agent Models Solution to Achieve EMC In Wireless Telecommunication Systems. 2018 1st Annual International Conference on Information and Sciences (AiCIS). doi: <https://doi.org/10.1109/aicis.2018.00061>
3. Alsaleem, N. Y. A., Kashmoola, M. A., Moskalets, M. (2018). Analysis of the efficiency of space-time access in the mobile communication systems based on an antenna array. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (9 (96)), 38–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150921>

4. Marotta, M. A., Kist, M., Wickboldt, J. A., Granville, L. Z., Rochol, J., Both, C. B. (2017). Design considerations for software-defined wireless networking in heterogeneous cloud radio access networks. *Journal of Internet Services and Applications*, 8 (1). doi: <https://doi.org/10.1186/s13174-017-0068-x>
5. De la Hoz, E., Gimenez-Guzman, J., Marsa-Maestre, I., Orden, D. (2015). Automated Negotiation for Resource Assignment in Wireless Surveillance Sensor Networks. *Sensors*, 15 (11), 29547–29568. doi: <https://doi.org/10.3390/s151129547>
6. Yin, C., Yang, R., Zhu, W., Zou, X. (2019). Research on Radio Frequency Assignment Method Based on Improved Genetic Algorithm. 2019 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD). doi: <https://doi.org/10.1109/icaibd.2019.8836999>
7. Ghosal, S., Ghosh, S. C. (2014). A Probabilistic Greedy Algorithm with Forced Assignment and Compression for Fast Frequency Assignment in Cellular Network. 2014 IEEE 13th International Symposium on Network Computing and Applications. doi: <https://doi.org/10.1109/nca.2014.36>
8. Peter, E. U., Olusegun, A. O. (2017). A neural network and genetic algorithm scheme for optimal dynamic channel assignment in mobile networks. 2017 IEEE 3rd International Conference on Electro-Technology for National Development (NIGERCON). doi: <https://doi.org/10.1109/nigercon.2017.8281887>
9. Chia, Y. S., Siew, Z. W., Yew, H. T., Yang, S. S., Teo, K. T. K. (2012). An evolutionary algorithm for channel assignment problem in wireless mobile networks. *ICTACT Journal on Communication Technology*, 3 (4), 613–618.
10. Поповський, В. В., Волотка, В. С. (2016). Methods for Arranged Selection of Suitable Features Using Genetic Fitness Algorithm. Тезиси доклада на Перша Міжнародна науково-технічна конференція РадіоЕлектроніка та Інфо-Комунікації УКРКОН' 2016. Київ, 131–135.
11. Huang, X., Shi, L., Zhang, C., Zhang, D., Chen, Q. (2017). Distributed resource allocation with imperfect spectrum sensing information and channel uncertainty in cognitive femtocell networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017 (1). doi: <https://doi.org/10.1186/s13638-017-0985-1>
12. Zhang, H., Chu, X., Wen, X. (2013). 4G Femtocells. *SpringerBriefs in Computer Science*. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9080-7>
13. Поповський, В. В., Олейник, В. Ф. (2011). Математические основы управления и адаптации в телекоммуникационных системах. Х.: ООО «Компания СМІТ», 362.
14. Поповський, В. В. (Ред.) (2013). Методи наукових досліджень в телекомунікаціях. Т. 2. Х.: Компанія СМІТ, 330.
15. Поповський, В. В. (2018). Основи теорії телекомунікаційних систем. Харків: ХНУРЕ, 368.